

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН ОБРАТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ ПРИ ГАШЕНИИ ПОЛЯ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. И. ВЕРХОТУРОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических
машин и общей электротехники)

Проблема гашения поля для ударного генератора приобретает особую актуальность в связи со специфическими условиями его работы. Для повышения импульсной мощности ударные генераторы перед импульсом тока статора часто возбуждаются до более высокого напряжения, чем номинальное, поэтому оставлять напряжение после импульса тока статора на таком высоком уровне даже на короткое время опасно по условиям нагрева.

В [1] было показано, что при гашении поля ударного генератора существует такая величина обратного напряжения, при которой суммарные электромагнитные потери холостого хода, выделяющиеся в генераторе за время гашения, минимальны. Однако при расчете оптимальных величин обратного напряжения не учитывалось насыщение магнитной цепи, а так как ударные генераторы в целях лучшего использования активных материалов выполняются с насыщенной магнитной цепью, то допущение о постоянстве индуктивности может привести к значительным погрешностям при расчете.

В данной статье рассматривается влияние изменения насыщения магнитной цепи на выбор оптимальных величин обратного напряжения, подводимого к обмотке возбуждения при гашении поля, и дается оценка погрешности, которая получается при расчете оптимальных коэффициентов без учета переменного насыщения.

При расчете переходных процессов в цепях возбуждения с учетом

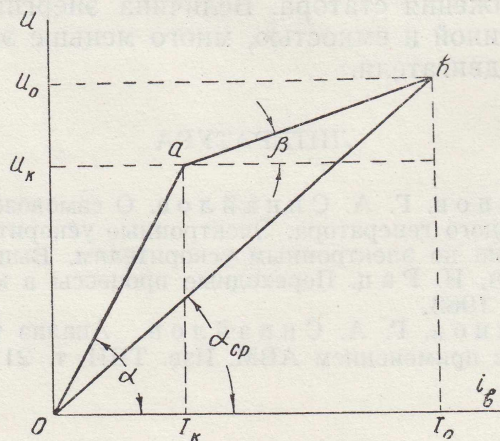


Рис. 1. К учету насыщения методом кусочно-линейной аппроксимации

насыщения наиболее широко применяется метод кусочно-линейной аппроксимации [2], при этом кривую намагничивания, как правило, заменяют двумя прямыми oa и ab (рис. 1).

Для решения поставленной задачи рассмотрим гашение поля насыщенной машины путем изменения полярности напряжения, подводимого к обмотке возбуждения ударного генератора. Пренебрегая потоками рассеяния между обмотками успокоительной и возбуждения, получим для участка характеристики ab (рис. 1) следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} r_2 i_2 + L_{2\beta} \frac{di_2}{dt} + \sqrt{L_{2\beta} L_{3\beta}} \frac{di_3}{dt} &= -k u_2 \\ r_3 i_3 + L_{3\beta} \frac{di_3}{dt} + \sqrt{L_{2\beta} L_{3\beta}} \frac{di_2}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

r_2, r_3 — активные сопротивления обмотки возбуждения и демпферной;

$L_{2\beta} L_{3\beta}$ — индуктивности тех же обмоток в насыщенной области;

k — кратность обратного напряжения, подводимого к обмотке возбуждения, по сравнению с номинальным.

Решение этой системы уравнений имеет вид:

$$i_2 = \frac{u_2}{r_2} \left[(1 + k) \text{Be}^{-\frac{t_1}{T_\beta}} - k \right], \quad (2)$$

$$i_3 = \frac{u_2}{r_2} (1 + k)(1 - B) e^{-\frac{t_1}{T_\beta}}, \quad (3)$$

где

$T_{2\beta} = \frac{L_{2\beta}}{r_2}$, $T_{3\beta} = \frac{L_{3\beta}}{r_3}$ — постоянные времени обмотки возбуждения и демпферной в насыщенной области;

$T_\beta = T_{2\beta} + T_{3\beta}$ — суммарная постоянная времени ротора в насыщенной области;

$B = \frac{T_{2\beta}}{T_\beta}$ — отношение постоянной времени обмотки возбуждения к суммарной постоянной времени в насыщенной области.

Главный поток в машине определяется суммарным током обеих обмоток и коэффициентом взаимоиנדукции между ротором и статором. На участке ab (рис. 1) поток изменяется по соотношению:

$$\Phi_\beta = \frac{u_2 M_\alpha}{r_2 w_1} \left\{ m(1 - c) + c \left[(1 + k) e^{-\frac{t_1}{T_\beta}} - k \right] \right\}, \quad (4)$$

где

M_α — коэффициент взаимоиנדукции между ротором и статором в ненасыщенной области;

$m = \frac{I_k}{I_0}$ — отношение токов возбуждения, соответствующего точке перегиба a к номинальному току;

w_1 — число витков обмотки статора;

$c = \frac{M_\beta}{M_\alpha}$ — отношение взаимоиנדуктивностей на насыщенном и ненасыщенном участках.

Время гашения поля на первом участке можно определить из условия равенства суммарного тока обмоток ротора в точке перегиба величины $m \frac{u_2}{r_2}$:

$$t_1 = T_\beta \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa + m} . \quad (5)$$

Выразим энергию потерь, выделяющуюся в стали машины при гашении поля на участке ба в зависимости от коэффициента κ

$$Q_{c\beta} = \frac{P_0' \cdot T_\beta}{[c + m(1 - c)]^2} \left\{ \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa + m} [m(1 - c) - c\kappa]^2 + (1 - m) \cdot c(2m - 1,5 m c - \kappa c + 0,5) \right\} , \quad (6)$$

где P_0' — потери холостого хода в стали машины.

В обмотке возбуждения

$$Q_{в\beta} = \int_0^{t_1} i_2^2 r_2 \cdot dt = \frac{u_2^2 \cdot T_\beta}{r_2} \left\{ \kappa^2 \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa + m} + (m - 1) B \times [2\kappa - B(\kappa + 0,5m + 0,5)] \right\} . \quad (7)$$

В демпферной обмотке

$$Q_{д\beta} = \int_0^{t_1} i_3^2 \cdot r_3 \cdot dt = - \frac{u_2^2}{r_2} (1 - B) T_\beta (m - 1)(\kappa + 0,5 m + 0,5) . \quad (8)$$

Сложив правые части уравнений (7) и (8), получим энергию потерь, выделяющуюся в демпферной обмотке и обмотке возбуждения:

$$Q_{в\beta} + Q_{д\beta} = \frac{u_2^2}{r_2} T_\beta \left[\kappa^2 \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa + m} + B(m - 1)(\kappa - 0,5 m - 0,5) \right] . \quad (9)$$

После перехода магнитной системы в ненасыщенное состояние (участок oa рис. 1) система дифференциальных уравнений будет иметь прежний вид (1), но вместо величин с индексом β в них войдут величины с индексом α .

С учетом новых начальных условий

$$i_2(0) + i_3(0) = m \frac{u_2}{r_2} , \quad (10)$$

выражения для токов примут вид:

$$i_2 = \frac{u_2}{r_2} \left[(\kappa + m) B e^{-\frac{t_2}{T_\alpha}} - \kappa \right] , \quad (11)$$

$$i_3 = \frac{u_2}{r_2} (\kappa + m)(1 - B) e^{-\frac{t_2}{T_\alpha}} , \quad (12)$$

где

$$T_{2\alpha} = \frac{L_{2\alpha}}{r_2} , \quad T_{3\alpha} = \frac{L_{3\alpha}}{r_3} - \text{постоянные времени обмоток возбуждения}$$

и демпферной в ненасыщенной области,

$T_\alpha = T_{2\alpha} + T_{3\alpha}$ — суммарная постоянная времени обмоток ротора в ненасыщенной области.

Поскольку на каждом из участков обмотки ротора находятся в одинаковых условиях относительно магнитной цепи, то отношение $\frac{T_{2\alpha}}{T_\alpha}$ будет таким же, как и $\frac{T_{2\beta}}{T_\beta}$, т. е. его также можно обозначить через B .

Время гашения определяется из условия:

$$i_2 + i_3 = 0, \quad (13)$$

откуда

$$t_2 = T_\alpha \ln \frac{\kappa + m}{\kappa}. \quad (14)$$

Поток на участке оа

$$\Phi_\alpha = \frac{u_2 M_\alpha}{r_2 w_1} \left[(\kappa + m) e^{-\frac{t_2}{T_\alpha}} - \kappa \right]. \quad (15)$$

Зависимость потерь в стали от κ для участка оа

$$Q_{c\alpha} = \frac{P_0' T_\alpha}{[c + m(1 - c)]^2} \left[\kappa^2 \ln \frac{\kappa + m}{\kappa} + m(0,5m - \kappa) \right]. \quad (16)$$

Энергия потерь, выделяющаяся в обмотке возбуждения на участке оа, равна

$$Q_{B\alpha} = \int_0^{t_2} i_2^2 \cdot r_2 \cdot dt = \frac{u_2^2}{r_2} T_\alpha \left[\kappa^2 \ln \frac{\kappa + m}{\kappa} + mB(0,5mB + B\kappa - 2\kappa) \right]. \quad (17)$$

В демпферной обмотке

$$Q_{d\alpha} = \int_0^{t_2} i_3^2 \cdot r_3 \cdot dt = \frac{u_2^2}{r_2} T_\alpha mB(1 - B)(0,5m - \kappa). \quad (18)$$

Суммарные потери в обмотках ротора при гашении для участка оа

$$Q_{B\alpha} + Q_{d\alpha} = \frac{u_2^2}{r_2} T_\alpha \left[\kappa^2 \ln \frac{\kappa + m}{\kappa} + 0,5Bm(m - 1) \right]. \quad (19)$$

Сложив потери энергии в стали машины (6), (16) и в обмотках ротора (9) и (19), получим зависимость суммарных потерь от коэффициента форсированного развозбуждения κ

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma H} = & \frac{u_2^2}{r_2} T_\alpha \left\{ \kappa^2 \ln \frac{(\kappa + 1)^c (\kappa + m)^{1-c}}{\kappa} + Bm(0,5m - \kappa) + \right. \\ & + cB(m - 1)(\kappa - 0,5m - 0,5) + \frac{p}{[c + m(1 - c)]^2} \times \\ & \times \left[\kappa^2 \ln \frac{\kappa + m}{\kappa} + m(0,5m - \kappa) + c[m(1 - c) - \right. \\ & \left. \left. - c\kappa]^2 \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa + m} + c^2(1 - m)(2m - 1,5mc - \kappa c + 0,5c) \right] \right\}, \quad (20) \end{aligned}$$

где $p = \frac{P_0' r_2}{u_2^2}$ — отношение электромагнитных потерь холостого хода в стали к потерям в обмотке возбуждения.

Величину k , при которой суммарные электромагнитные потери холостого хода за время развозбуждения машины будут минимальны, можно найти, приравняв производную от $Q_{\Sigma H}$ по k нулю

$$\frac{dQ_{\Sigma H}}{dk} = 0. \quad (21)$$

Трансцендентное уравнение (21) может быть решено приближенно с любой степенью точности относительно k . Значения коэффициентов форсированного развозбуждения, при которых потери будут минимальными, обозначаются через $k_{огн}$ и называются оптимальными. Значения оптимальных коэффициентов форсированного развозбуждения, определенные из решения уравнения (21) для $p=10$ при изменении $\frac{T_3}{T_2} = 0,8 \div 1$, $m=0,5$, $c=0,3$, представлены в табл. 1. Здесь же представлены значения оптимальных коэффициентов $k_{ог}$, определенные для этих же параметров, но при постоянном насыщении.

Таблица 1		
$\frac{T_3}{T_2}$	$p=10$	
	$k_{огн}$	$k_{ог}$
0,8	2,12	2,18
1	2,03	2,0

Как видно из табл. 1, оптимальные коэффициенты, рассчитанные с учетом переменного насыщения и без учета насыщения для одних и тех же $\frac{T_3}{T_2}$ и p , практически совпадают. Относительное постоянство оптимальных коэффициентов форсированного развозбуждения с изменением насыщения магнитной цепи можно объяснить тем, что для заданного режима оптимальный коэффициент форсированного развозбуждения определяется в основном отношением $\frac{T_3}{T_2}$, которое практически остается неизменным при изменении насыщения, так как обмотки ротора находятся в одинаковых в магнитном отношении условиях.

В суммарных потерях энергии, выделяющихся в машине при снижении напряжения от заданного значения до нуля, отдельные составляющие потерь с изменением k ведут себя неодинаково. Так, потери энергии в стали с увеличением k уменьшаются, тогда как потери в обмотке возбуждения и демпферной увеличиваются. Поэтому снижение напряжения с оптимальным k можно применять только в том случае, если потери в обмотке возбуждения или в роторе в целом за время снижения не превышают допустимых по условиям нагрева потерь.

Таким образом, при расчете оптимальных величин обратного напряжения, подводимого к обмотке возбуждения ударного генератора, насыщение магнитной цепи достаточно учитывать выбором насыщенных значений параметров для заданного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, А. И. Верхотуров. Расчет оптимальных величин обратного напряжения при гашении поля ударного генератора. Изв. ТПИ, т. 212, 1971.
2. О. Б. Брон. Автоматы гашения магнитного поля. Госэнергоиздат, 1961.